

## **Aeração: Suporte a Tomada de Decisão**

Por: Luís César da Silva

### **1. Introdução**

Neste boletim é apresentado o aplicativo computacional **AgaisAera** estruturado para o suporte a tomada de decisão quanto a condução da operação aeração de grãos armazenados. Para desenvolvimento foram empregadas as linguagens de programação PHP e VBA - *Visual Basic for Application*<sup>®</sup>. O PHP destina ao desenvolvimento de aplicativos para rodar “on line” na Internet, enquanto o VBA permite o desenvolvimento de aplicativos no ambiente dos programas que compõem o Microsoft<sup>®</sup> Office, dentre estes o Excel.

Para ter acesso as versões do **AgaisAera** desenvolvida em PHP, ou no formato planilha Microsoft Excel<sup>®</sup> acesse o sítio [www.agais.com](http://www.agais.com), seção **Aplicativos**.

### **2. Manejo da operação de aeração**

A aeração de produtos armazenados é uma das operações do pré-processamento de grãos, em que, por meio da passagem de um fluxo de ar pela massa de grãos limpa e seca busca-se a: (a) renovação do ar do presente no espaço intergranular, (b) remoção de odores, (c) homogeneização do teor de água do produto, e (d) uniformização da temperatura do produto.

Durante o período de armazenagem podem ocorrer danos, e ou perdas, como: (a) depreciação da qualidade do produto devido à deterioração fúngica; (b) redução da massa do produto devido a insetos e, ou respiração do produto; (d) contaminação do produto com micotoxinas; ou (e) umidificação ou supersecagem do produto.

#### **Abstract**

#### **Aeration - Decision Support**

(Federal University of Espírito Santo - Food Engineering Department - Technical Bulletin: AG: 02/17 - 01/26/2017 )

This extension bulletin describes the **AgaisAera**, a tool to support decision-making in the aeration of stored grains. Using **AgaisAera** the psychrometric conditions of the ambient, insufflated and intergranular air are calculated; the equilibrium moisture content considering the psychrometric conditions of the inflated air; and hygroscopic grain properties such as equilibrium relative humidity and water activity. On the basis of this information, a risk analysis is made for the aeration operation. A free download can be done in [www.agais.com](http://www.agais.com).

Dr. Luís César Silva – website: [www.agais.com](http://www.agais.com)

Para minimizar esses danos e, ou perdas, é estratégico a condução da operação de aeração fundamentada em três pontos: (1) sistema de aplicação do ar devidamente dimensionado e implantado; (2) manejo adequado da massa de grãos quanto à limpeza, secagem e o acondicionamento em silos ou graneleiros; e (3) monitoração da condição psicrométrica do ar insuflado e das características higroscópicas do produto armazenado.

Os sistemas de aeração de grãos armazenados operam com baixos fluxos de ar, em silos é recomendado fluxos de 30 a 100 L de ar/ min/ t de produto, enquanto em graneleiros os valores variam de 100 a 200 L de ar/ min/ t de produto. Evidentemente, quanto maior o fluxo de ar menor será o tempo demandado para execução da aeração.

Há recomendações técnicas de 120 horas de aeração por mês, o que equivale, aproximadamente, 24 horas por semana. Porém, isso dependerá da ocorrência de condições psicrométricas ideais para condução da aeração.

No que se refere ao manejo da massa de grãos, a mesma deve apresentar devidamente limpa e seca. E ao acondicionar a mesma em silos ou graneleiros, devem ser empregados meios para distribuição uniforme das impurezas pela massa de grãos, a fim de evitar, por exemplo, a concentração de “finos” na parte central dos silos ou graneleiros, o que obstrui a circulação do ar pelo espaço intergranular.

Para monitoração da condição psicrométrica do ar a unidade armazenadora deve contar com equipamentos meteorológicos para medição de propriedades do ar ambiente como temperatura e umidade relativa. Conhecendo essas informações, o operador do sistema, o tomador de decisão, tem como determinar as propriedades do ar antes e após a passagem pelo ventilador. Normalmente, ao passar pelo ventilador a temperatura do ar pode aumentar em até 4 °C, o que dependerá da intensidade do fluxo de ar e da potência do ventilador. E por fim, conhecendo as condições psicrométricas do ar insuflado, o operador tem como determinar o teor de umidade de equilíbrio, utilizando tabelas ou equações. Entende-se, nesse caso, como teor de umidade de equilíbrio, o teor de água que o produto atingirá se for mantido em contato com o ar insuflado.

Quanto à monitoração das propriedades higroscópicas do produto armazenado, primeiro há de se ter segurança quanto à homogeneidade do teor de água do produto no momento de carregamento dos silos e, ou graneleiros. Isso é importante, pois uma vez o produto armazenado, não há equipamentos que permitam monitorar “*in loco*” a variação do teor de água do produto. O usual é monitorar a temperatura empregando sensores analógicos como termopares, e, recentemente, empresas brasileiras estão disponibilizando sensores digitais, que permitem medir a temperatura da massa de grãos e a umidade relativa do ar no espaço intergranular.

Por meio da determinação da umidade relativa do ar intergranular é possível calcular a atividade de água do ambiente, que corresponde ao valor da umidade relativa dividido por

cem. A deterioração fúngica em grãos armazenados ocorre quando a atividade de água no espaço intergranular varia de 0,65 a 0,90. E para valores acima de 0,90 prevalece o desenvolvimento de bactérias decompositoras.

Ao se utilizar sensores analógicos, termopares, o gestor do sistema de aeração infere o valor da umidade relativa do ar intergranular, considerando, que o produto está em equilíbrio higroscópico. Assim, em função da temperatura e teor de água do produto e utilizando tabelas ou equações produto é determinada a umidade relativa do ar intergranular. Mas erros podem comprometer a precisão dessa inferência, como:

- O teor de água do produto armazenado está correto e padronizado?
- O produto está na condição de equilíbrio com o ar intergranular?

Se por erro operacional for insuflado na massa de grãos um fluxo de ar com alto valor de umidade relativa poderá ocorrer a umidificação do ar intergranular, sem provocar alterações percebíveis no teor de água do produto. Nesse caso, o aumento da umidade relativa do ar intergranular favorecerá a proliferação de fungos.

Desse modo, na gestão de um sistema de aeração cabe ao tomador de decisão: (1) determinar as condições psicrométricas do ar ambiente e do ar após a passagem pelo ventilador utilizando gráfico psicrométrico ou equações; (2) determinar o teor de umidade de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar aquecido; e (3) comparar os valores da umidade de equilíbrio e do teor de água do produto, para certificar se o momento é propício para condução da aeração. Sendo assim, visando facilitar a condução dessas tarefas foi desenvolvido o **AgaisAera** nas versões “on line” e planilha eletrônica, em que o usuário:

- 1º - define parâmetros para o cálculos das propriedades psicrométricas do ar ambiente: altitude, temperatura e umidade relativa;
- 2º - define o aquecimento associado ao funcionamento do ventilador; e
- 3º - escolhe o produto e define o teor de água e temperatura do mesmo.

Baseado nessas informações o aplicativo calcula: (a) as propriedades psicrométricas do ar ambiente e do ar aquecido; (2) o teor de umidade de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar aquecido; (3) a umidade relativa de equilíbrio em função da temperatura e teor de umidade do produto; e (4) as condições psicrométricas do ar intergranular em função da umidade relativa de equilíbrio e temperatura do produto.

Para a análise de riscos associados a condução da operação de aeração o **AgaisAera** pondera:

- 1º - Se o teor de água do produto é superior ou inferior em mais de quatro pontos percentuais ao teor de água ideal para comercialização do produto.

Se sim é o usuário é notificado da condição inapropriada para armazenagem do produto;

- 2º - Se o teor de umidade de equilíbrio está contido no intervalo equivalente a  $\pm 0,5$  pontos percentuais em relação ao teor de água do produto armazenado. Se sim caracteriza uma situação ideal para condução da aeração. Além disso, é avaliado o potencial de resfriamento da massa de grãos, o que pode ocorrer se a temperatura do ar insuflado for inferior em mais de 3°C a temperatura do produto;
- 3º - Se o teor de umidade de equilíbrio for superior ao teor de água do produto em mais 0,5 pontos percentuais. Se sim, é alertado o risco de umidificação do produto e do ar intergranular. E caso a atividade de água do espaço intergranular possa tornar superior a 0,70 é indicado o alto risco de proliferação de fungos; e
- 4º - Se o teor de umidade de equilíbrio for inferior ao teor de água do produto em mais de 0,5 pontos percentuais. Se sim, é destacado o risco de supersecagem e é calculada a quebra de umidade. Nesse caso, é alertado que a quantidade de produto superseco dependerá do tempo de funcionamento dos ventiladores e da intensidade do fluxo aplicado.

### 3. Análise de cenários com o **AgaisAera**

Para demonstra o uso do aplicativo **AgaisAera** é apresentado na Tabela 01 a proposição de seis cenários a serem analisados, em que o produto armazenado é milho com teor de água 14,00%.

Tabela 01 – Proposição de cenários para tomada de decisão na condução da operação de aeração dose grãos armazenados

Parâmetros	Cenários					
	I	II	III	IV	V	VI
Temperatura ambiente (°C)	18	15	30	18	20	18
Umidade relativa ambiente (%)	75	75	50	90	60	90
Teor de umidade do produto (%)	14	14	14	14	14	14
Temperatura do produto (°C)	20	20	20	20	30	30

#### a) Análise do Cenário I

Para análise do Cenário I foi empregado a versão planilha do **AgaisAera**. Conforme a Figura 01, primeiro são inseridos os dados para o cálculo das condições psicromérticas do ar ambiente, em que o usuário informa a altitude da localidade e a temperatura e umidade

relativa do ar ambiente. Ao invés da umidade reativa, o usuário poderá optar por fornecer o valor da temperatura de bulbo úmido, temperatura do ponto de orvalho, razão de mistura, volume específico, ou entalpia. E ao acionar o botão “Calcular” são calculadas as propriedades psicrométricas do ar ambiente, Figura 02.

The screenshot shows the 'AgaisAera' software interface with three distinct input sections:

- Condição psicrométrica do ar ambiente:** Includes input fields for 'Altitude local (m):' (0), 'Temperatura de bulbo seco (°C):' (18), and a dropdown for 'Umidade Relativa (%)' (75). It has 'Calcular' and 'Limpar' buttons.
- Aquecimento proporcionado pelo ventilador:** Includes an input field for 'Acréscimo de temperatura ao ar (°C):' (2). It has 'Calcular' and 'Limpar' buttons.
- Característica do produto:** Includes a dropdown for 'Produto armazenado:' (Milho), an input field for 'Teor de água do produto (%)' (14), and an input field for 'Temperatura dos grãos (°C):' (20). It has 'Calcular' and 'Limpar' buttons.

Figura 01 – Janela de diálogo do aplicativo **AgaisAera** – Entrada de dados Cenário I

Em seguida, o usuário informa o aquecimento proporcionado pelo ventilador, que para o Cenário I foi +2 °C e aciona o botão “Calcular”, sendo então calculadas as condições psicrométricas do ar insuflado ou ar aquecido, Figura 02.

Conforme a Figura 02, ao comparar as condições psicrométricas do ar ambiente e do ar insuflado observa-se que a temperatura aumentou de 18 para 20 °C e a umidade relativa reduziu de 75 para 66,22%.

E por fim o usuário informa à condição que o produto está armazenado e aciona o botão “Calcular”, sendo então calculadas as condições psicrométricas do ar intergranular, Figura 02.

Conforme os resultados para o ar intergranular, Figura 02, a temperatura é de 20 °C, umidade relativa 66,48% e pressão de vapor de 1.554,24 Pascal. Portanto, o valor da atividade de água na massa de grão será 0,664, que equivale à umidade relativa do ar intergranular, ou o mesmo que, umidade relativa de equilíbrio dividida por cem.

Ar ambiente	Ar aplicado:	Ar intergranular
Temperatura do ar (°C):	18.00	20.00
Umidade relativa (%):	75.00	66.22
Pressão de vapor ( Pa):	1547.69	1548.04
Pressão de atmosférica (Pa):	101325.00	101325.00
Raz. de mistura (kg de vapor/kg ar seco):	0.00965	0.00965
Volume específico (m <sup>3</sup> /kg ar seco):	0.838	0.843
Entalpia (k Joule/kg ar seco):	42.58	44.64
Entalpia ( k Cal/kg ar seco)	10.14	10.63

**Análise de risco:**

CONDIÇÃO PROPICIA A CONDUÇÃO DA OPERAÇÃO DE AERAÇÃO

A umidade de equilíbrio, 13,95%, e o teor de umidade dos grãos armazenados, 14,00% possuem valores próximos.

O tempo para realização da operação dependerá da intensidade do fluxo de ar aplicado (m<sup>3</sup> de ar/min.t).

Figura 02 – Janela de diálogo do aplicativo **AgaisAera** – Resultados Cenário I

Em sequência o usuário na seção “Análise de risco”, Figura 02, aciona o botão “Obter”, sendo então elaborado o parecer. Assim, para o Cenário I é afirmado que a condição é propícia a condução da operação de aeração, uma vez que o teor de umidade de equilíbrio associada às condições psicrométricas do ar insuflado é 13,95%, enquanto o teor de água do produto é 14,00%. Desse modo, por esses valores serem próximos, implica que não há risco de alteração do teor de água do produto armazenado. Além disso, as umidades relativas do ar insuflado e do ar intergranular possuem valores próximos 66,22 e 66,48%, respectivamente. Nesse caso, a atividade de água no espaço intergranular, 0,664, praticamente, não será alterada.

#### b) Análise do Cenário II

Para análise do Cenário II, também foi empregada a versão planilha do **AgaisAera**, em que, a temperatura do ar ambiente é 15,00 °C e a umidade relativa de 75,00%. Assim, depois da passagem do ar pelo ventilador a temperatura aumentou para 17 °C e a umidade relativa reduziu para 66,00%, Figura 03.



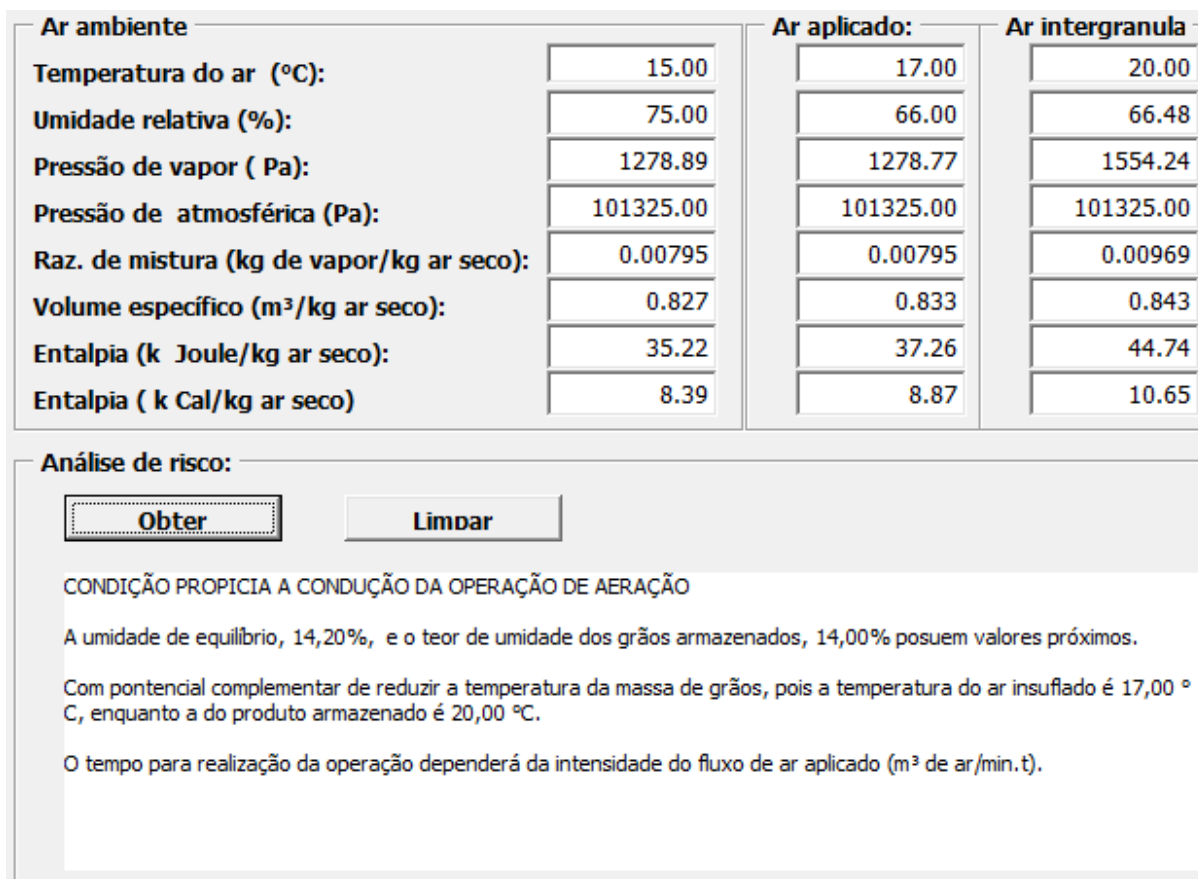


Figura 03 – Janela de diálogo do aplicativo **AgaisAera** – Resultados Cenário II

Ao obter o parecer da análise de risco para o Cenário II, Figura 03, é indicado condição propicia, pois o teor de umidade de equilíbrio e o teor de água do produto possuem valores próximos, 14,20 e 14,00%, respectivamente. Além disso, é destacada a possibilidade de haver a redução da temperatura do produto armazenado, pois o ar insuflado tem a temperatura de 17,00 °C, enquanto o produto está a 20,00 °C. Importante: quanto menor a temperatura do produto armazenado, menores serão as taxas de respiração do produto e de proliferação de insetos e fungos. Consequentemente, menores serão as perdas qualitativas e quantitativas do produto.

### c) Análise do Cenário III

Para análise do Cenário III, Figura 04, foi empregada a versão “on line” do **AgaisAera**. Nesse cenário observa-se que a temperatura e umidade relativa do ar ambiente, que eram, respectivamente, 30,00 °C e 50,00%, ao passar pelo ventilador alteraram para 32 °C e 44,62%. Desse modo, na análise de riscos, é reportada a possibilidade de supersecagem, pois o teor de umidade de equilíbrio para o ar insuflado é 9,70%, enquanto o produto armazenado apresenta teor de água de 14,00%. Nesse caso, é estimada a quebra de umidade de 4,76%, sendo alertado, que a quantidade de produto a

ser superseca dependerá da intensidade do fluxo de ar (L de ar/ min /t de produto) e do tempo de funcionamento do sistema de aeração.

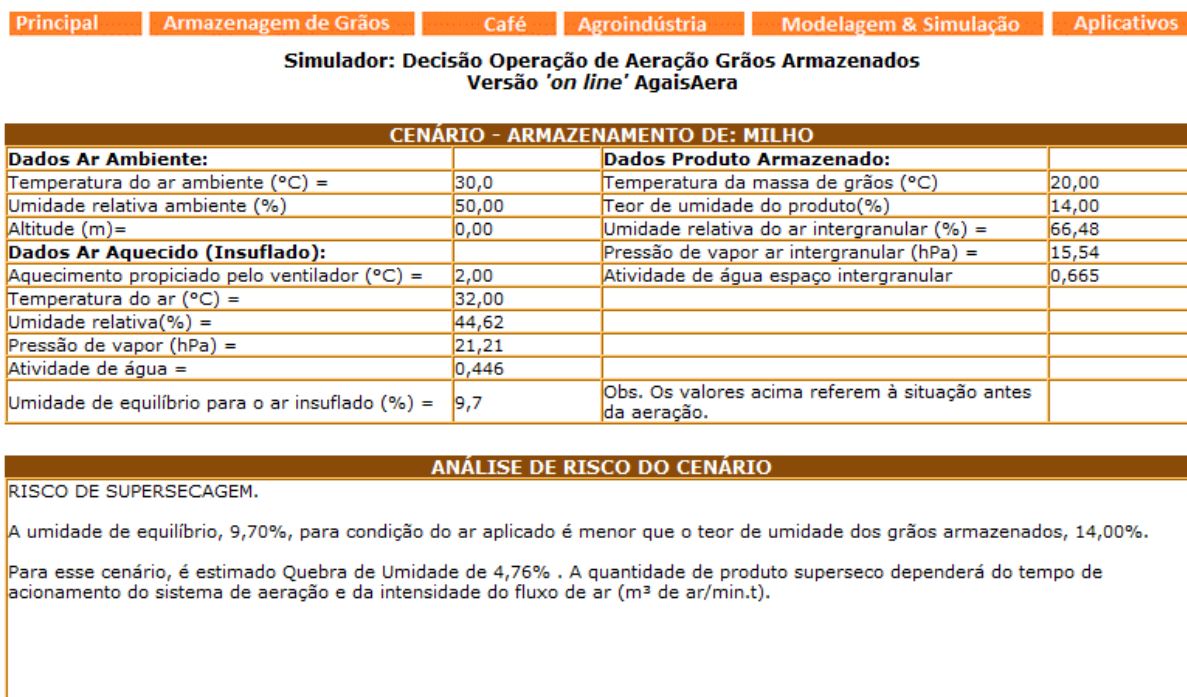


Figura 04 – Janela de diálogo do aplicativo **AgaisPsicro** versão “on line” – Cenário III

#### d) Análise do Cenário IV

Para o Cenário IV, Figura 05, a temperatura e umidade relativa do ar ambiente são 18,00 °C e 90,00%, respectivamente, e após o aquecimento devido à passagem pelo ventilador os valores passam para 20,00 °C e 79,42%. Desse modo, para condição do ar insuflado é calculada a umidade de equilíbrio de 16,50% e atividade de água de 0,794. Portanto, para esse Cenário há risco de umidificação do ar intergranular para o nível de atividade de água de 0,794, o que favorece a proliferação de fungos e conseqüentemente de metabolização de micotoxinas. Quanto produto há o risco de umidificação, no entanto, o processo é demorado. Portanto, o maior risco é a proliferação de fungos, tendo por conseqüência o rápido aumento da temperatura do produto.

#### e) Análise do Cenário V

O Cenário V, Figura 06, refere a uma situação adversa, em que o produto armazenado apresenta teor de água de 14,00%, mas a temperatura é de 30,00 °C. Na análise do ar insuflado detecta-se o risco de supersecagem, pois o ar ambiente com 20,00 °C e umidade relativa de 60,00%, ao ser aquecido têm os valores alterados para 22,00 °C e 53,06%, o que implica no teor de umidade de equilíbrio 11,63% e, conseqüentemente, quebra de umidade de 2,68%.



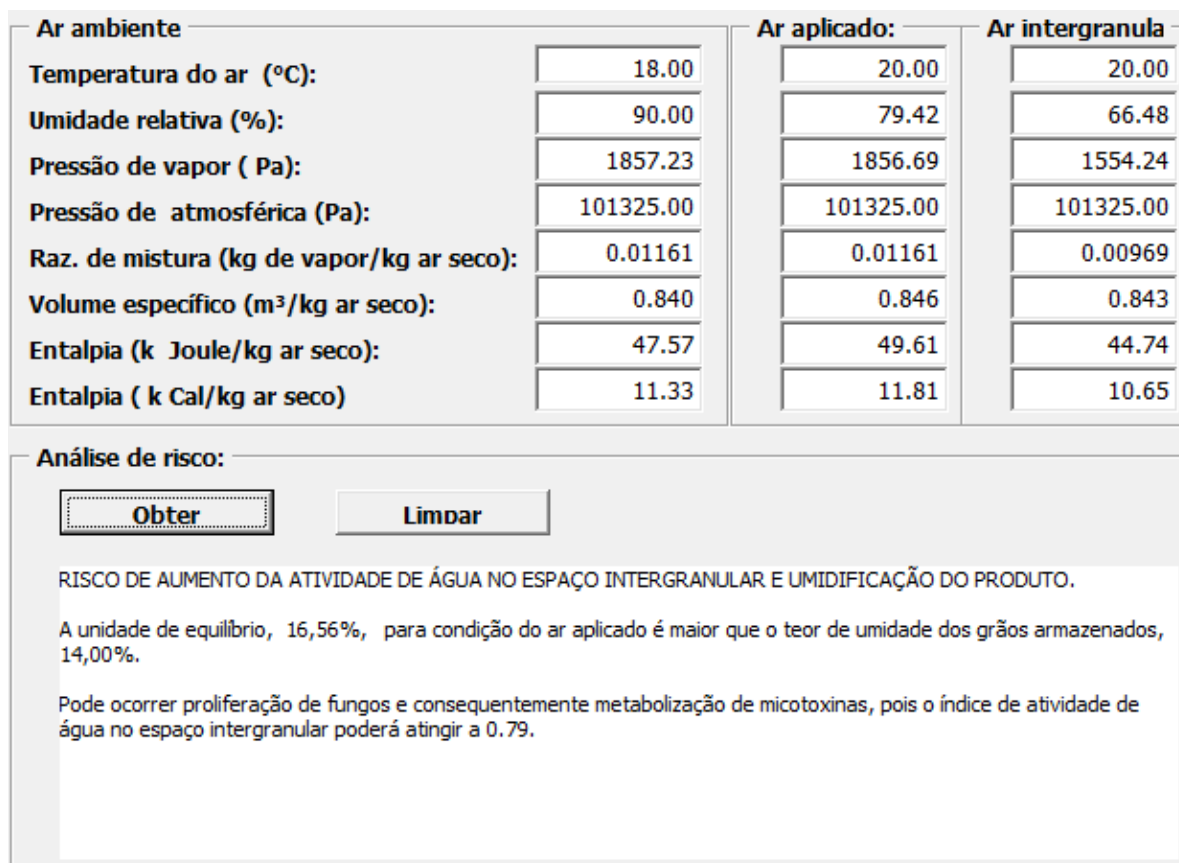


Figura 05 – Janela de diálogo do aplicativo **AgaisAera** – Cenário IV.

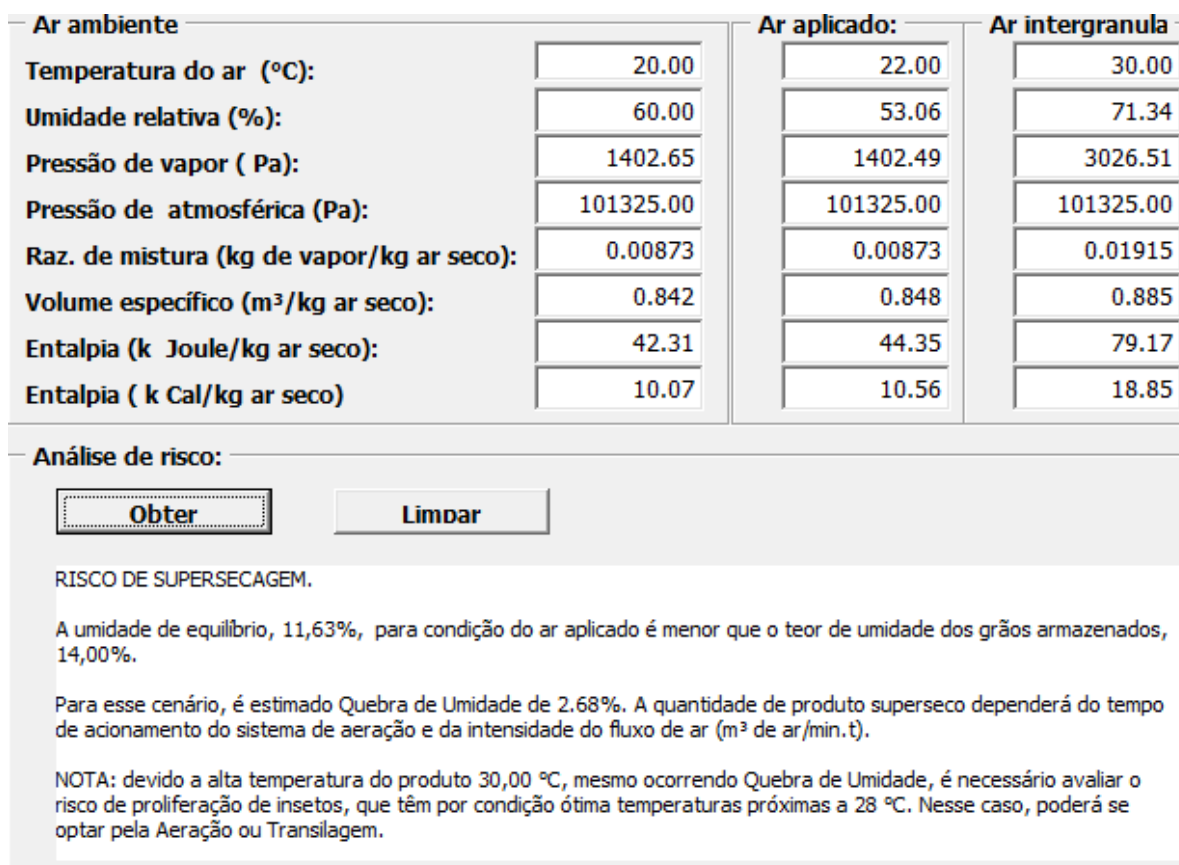


Figura 06 – Janela de diálogo do aplicativo **AgaisAera** – Cenário V.

No entanto, Figura 06, como a temperatura do produto apresenta valores próximos a 28 °C implica no risco de proliferação de insetos e fungos, que possuem esses níveis temperaturas como ótimas para o desenvolvimento. Além disso, a taxa de respiração do produto aumenta. Todos esses fatores contribuem para perdas qualitativas e quantitativas. Nesse caso caberá ao tomador de decisão avaliar se as perdas devido à supersecagem serão ou não suplantadas pelas perdas devido a altas temperaturas do produto. Assim, o tomador de decisão poderá optar pela transilagem, ou a aeração com risco de supersecagem.

### e) Análise do Cenário VI

No Cenário VI, também é constatada uma condição adversa de armazenagem, em que, a temperatura do produto é 30,00 °C e o teor de água 14,00%.

Conforme a Figura 07, há indicativo de risco de umidificação do espaço intergranular e do produto, pois o ar insuflado apresenta temperatura de 20 °C e umidade relativa de 79,45%, o que define o teor de umidade de equilíbrio igual a 16,60%, sendo superior ao teor de umidade do produto armazenado.

Principal	Armazenagem de Grãos	Café	Agroindústria	Modelagem & Simulação	Aplicativos
<b>Simulador: Decisão Operação de Aeração Grãos Armazenados</b> <b>Versão 'on line' AgaisAera</b>					
<b>CENÁRIO - ARMAZENAMENTO DE: MILHO</b>					
<b>Dados Ar Ambiente:</b>			<b>Dados Produto Armazenado:</b>		
Temperatura do ar ambiente (°C) =	18,0	Temperatura da massa de grãos (°C)	30,00		
Umidade relativa ambiente (%)	90,00	Teor de umidade do produto(%)	14,00		
Altitude (m)=	0,00	Umidade relativa do ar intergranular (%) =	71,34		
<b>Dados Ar Aquecido (Insuflado):</b>			Pressão de vapor ar intergranular (hPa) =		
Aquecimento propiciado pelo ventilador (°C) =	2,00	Atividade de água espaço intergranular	0,713		
Temperatura do ar (°C) =	20,00				
Umidade relativa(%) =	79,45				
Pressão de vapor (hPa) =	18,57				
Atividade de água =	0,794				
Umidade de equilíbrio para o ar insuflado (%) =	16,6	Obs. Os valores acima referem à situação antes da aeração.			
<b>ANÁLISE DE RISCO DO CENÁRIO</b>					
RISCO DE AUMENTO DA ATIVIDADE DE ÁGUA NO ESPAÇO INTERGRANULAR E UMIDIFICAÇÃO DO PRODUTO.					
A umidade de equilíbrio, 16,56%, para condição do ar aplicado é maior que o teor de umidade dos grãos armazenados, 14,00%.					
Pode ocorrer proliferação de fungos e consequentemente metabolização de micotoxinas, pois o índice de atividade de água no espaço intergranular poderá atingir a 0,794.					
NOTA: devido a alta temperatura do produto 30,00 °C, mesmo ocorrendo risco de umidificação do ar intergranular e do produto, é necessário avaliar o risco de proliferação de insetos, que têm por condição ótima temperaturas próximas a 28 °C. Nesse caso, poderá se optar pela Aeração ou Transilagem.					

Figura 07 – Janela de diálogo do aplicativo **AgaisAera** – Cenário VI.

Outra questão de risco, Figura 07, é o aumento da atividade de água no espaço intergranular,, o que favorece a proliferação de fungos. No entanto, apesar desse risco, a

temperatura do produto é alta, 30,00 °C, o que pode favorecer as proliferações de insetos e fungos e, ou o aumento da taxa de respiração do produto. Fatos que podem causar perdas qualitativas e, ou quantitativas. Nesse caso, caberá ao tomador de decisão mensurar o risco da deterioração fúngica devido ao aumento da atividade de água no espaço intergranular ou evitar perdas devido à proliferação de pragas e aumento da taxa de respiração.

#### 4. Ponderações finais

O **AgaisAera** é uma ferramenta de suporte a tomada de decisão, ou seja, cabe ao usuário a análise dos pareceres elaborados pelo aplicativo e ponderá-los se os mesmo apresentam aplicabilidade para o cenário real em análise.

Por meio do **AgaisAera** são calculadas as condições psicrométrica do ar ambiente, insuflado e intergranular; o teor de umidade de equilíbrio considerando as condições psicrométricas do ar insuflado; e propriedades higroscópicas dos grãos como umidade relativa de equilíbrio e atividade de água. E com base nessas informações são feitas análise quanto à indicação da condução da operação de aeração.

Para o uso adequado do **AgaisAera** é recomendado que o usuário possua conhecimentos quanto a psicrometria, higroscopia e manejo de sistemas de aeração.

#### 6. Bibliografias consultadas

1993 ASHRAE Handbook: Fundamentals (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta GA, USA).

ASAE. Moisture relationships of grains. Standard D245.4, American Soc. Agricultural Eng. 1991.

ASAE. Psychrometric sata. Standard D271.2 DEC94, American Soc. Agricultural Eng. 1988.

MELO, E. C., LOPES, D. C., CORRÊA, P. C. GRASPSI - Programa computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar. Engenharia na Agricultura, Viçosa: MG, v .12, n. 2, p. 154-162. 2004.